

Emissões de Gases de Efeito Estufa em Cultivo de Arroz Irrigado: Efeito do Manejo da Adubação Nitrogenada



ISSN 1678-2518

Outubro, 2017

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Clima Temperado
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 259

Emissões de Gases de Efeito Estufa em Cultivo de Arroz Irrigado: Efeito do Manejo da Adubação Nitrogenada

Thaís Antolini Veçozzi
Walkyria Bueno Scivittaro
Rogério Oliveira de Sousa
Anderson Dias Silveira
Thaís Murias Jardim

Embrapa Clima Temperado
Pelotas, RS
2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Clima Temperado

Endereço: BR 392, Km 78

Caixa postal 403, CEP 96010-971 - Pelotas/RS

Fone: (53) 3275-8100

www.embrapa.br/clima-temperado

www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê de Publicações da Embrapa Clima Temperado

Presidente: *Ana Cristina Richter Krolow*

Vice-Presidente: *Enio Egon Sosinski Junior*

Secretária: *Bárbara Chevallier Cosenza*

Membros: *Ana Luiza Barragana Viegas, Fernando Jackson, Marilaine Schaun Pelufê, Sonia Desimon*

Revisão de texto: *Sabrina D'Ávila (estagiária); Bárbara C. Cosenza (supervisão)*

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufê*

Editoração eletrônica: *Fernando Jackson*

Foto de capa: *Walkyria Bueno Scivittaro*

1ª edição

Obra digitalizada (2017)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Clima Temperado

E53 Emissões de gases de efeito estufa em cultivo de arroz irrigado: efeito do manejo da adubação nitrogenada / Thaís Antolini Veçozzi... [et al.]. - Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017.
39 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1678-2518 ; 259)

1. Fertilizante nitrogenado. 2. Arroz irrigado.
3. Adubação. 4. Uréia. I. Veçozzi, Thaís Antolini. II. Série.

CDD 633.18

©Embrapa 2017

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e Métodos	12
Resultados e Discussão	17
Conclusões	29
Referências	31

Emissões de Gases de Efeito Estufa em Cultivo de Arroz Irrigado: Efeito do Manejo da Adubação Nitrogenada

Thaís Antolini Veçozzi¹
Walkyria Bueno Scivittaro²
Rogério Oliveira de Sousa³
Anderson Dias Silveira⁴
Thaís Murias Jardim⁵

Resumo

A eficiência do uso do nitrogênio (N) da cultura do arroz é normalmente baixa devido à complexa dinâmica do nutriente no sistema solo-planta, refletindo-se em perdas, com destaque para aquelas originadas pela produção de óxido nitroso (N₂O). Assume, portanto, fundamental importância o manejo adequado de fertilizantes nitrogenados no cultivo de arroz irrigado. Este trabalho teve por objetivo avaliar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de fertilizante nitrogenado de liberação controlada no cultivo de arroz irrigado, bem como a eficiência agrônômica desse fertilizante, comparativamente à ureia. O estudo foi realizado na safra 2013/2014, em Planossolo Háptico, no município de Capão do Leão, RS. Avaliaram-se os seguintes tratamentos: testemunha com omissão da adubação nitrogenada e a dose recomendada de N para o arroz

¹ Gestora Ambiental, doutoranda do Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faem/UFPeL, Pelotas, RS.

² Engenheira-agrônoma, doutora, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

³ Engenheiro-agrônomo, professor doutor da Faem/UFPeL, Pelotas, RS.

⁴ Engenheiro-Agrônomo, mestrando do Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faem/UFPeL, Pelotas, RS.

⁵ Graduanda em Agronomia, Faem/UFPeL, Pelotas, RS.

(120 kg ha⁻¹), como ureia, parcelada em três aplicações (semeadura e nos estádios de quatro folhas e de iniciação da panícula), e como fertilizante de liberação controlada, aplicado integralmente a lanço em superfície ou localizado no sulco de semeadura. Periodicamente, realizaram-se coletas de amostras de ar, pelo método da câmara estática fechada. O uso de fertilizante nitrogenado de liberação controlada em dose única, em pré-semeadura em cultivo de arroz irrigado proporciona produtividade de grãos e eficiência agrônômica no uso do nitrogênio, semelhantes à da ureia, aplicada de forma parcelada entre a semeadura e em cobertura. Não há diferença quanto às fontes e forma de aplicação do N sobre as emissões de CH₄ e de N₂O do solo. O metano contribui com mais de 90% para o potencial de aquecimento global parcial do arroz irrigado, independentemente do manejo da adubação nitrogenada com fontes solúvel ou de liberação controlada. O aporte de nitrogênio para o arroz irrigado, via adubação, com fertilizante de liberação controlada em dose única em pré-semeadura é uma prática sustentável, otimizando o rendimento de grãos e mantendo estável a relação entre o potencial de aquecimento global da cultura e o rendimento de grãos, relativamente à ureia.

Termos para indexação: óxido nitroso, metano, fonte de nitrogênio, fertilizante de liberação controlada, *Oryza sativa* L.

Greenhouse Gases Emissions from Irrigated Rice Crop: Effect of the Management of Nitrogen Fertilization

The efficiency of nitrogen (N) use of the rice crop is usually low due to the complex dynamics of the nutrient in the soil-plant system, reflecting in losses, particularly those arising from the production of nitrous oxide (N₂O). Therefore, it is essential to adopt proper fertilizer management in irrigated rice cultivation. This study aimed to evaluate greenhouse gas emissions associated with the use of controlled-release nitrogen fertilizer in irrigated rice cultivation, compared to urea. The study was carried out in 2013/2014 growing season, in a Planossolo (Typic Albaqualf), at Embrapa Temperate Agriculture, in Capão do Leão, State of Rio Grande do Sul, Brazil. The following treatments were evaluated: control with omission of nitrogen fertilization and the recommended dose of N for rice (120 kg ha⁻¹), such as urea, split in three applications (seeding and at the four leaves and panicle initiation stages), or as controlled-release nitrogen fertilizer (39.4-00-00), fully broadcasted on surface or located in the planting furrow. The air sampling for CH₄ and N₂O soil emissions analysis was performed at least once a week, using static closed chambers. The use of single application of controlled-release nitrogen fertilizer pre-sowing to rice provides similar grain yield and agronomic efficiency to urea splitted between sowing and topdressing. There is no difference between the sources and forms of N application on soil emissions of

CH₄ and N₂O. Methane contributes over 90% to the global warming potential partial in rice, regardless of the management of nitrogen fertilization with soluble or controlled release sources. Nitrogen supply to flooded rice, via fertilization, with controlled release fertilizer in single dose pre-sowing is a sustainable practice for optimizing the yield and maintain a stable relationship between the global warming potential and crop yield, comparing to urea.

Index terms: nitrous oxide, methane, nitrogen source, controlled-released fertilizer, Oryza sativa L.

Introdução

A agricultura responde por cerca de 10% a 12% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) de origem antropogênica, o que inclui 60% e 50% das emissões globais de óxido nitroso (N_2O) e de metano (CH_4), respectivamente (SMITH et al., 2007). Considerando-se o representativo potencial de emissão de GEE desse setor e a crescente preocupação com as mudanças climáticas, é necessário empreender esforços para mitigar as emissões de GEE de sistemas agrícolas.

Os sistemas agrícolas em condições de cultivo aeróbio emitem preponderantemente N_2O , enquanto que os sistemas alagados (anaeróbios), particularmente envolvendo o cultivo de arroz irrigado por inundação do solo, emitem CH_4 e N_2O . Nesse sentido, dados obtidos por Linqvist et al. (2012b) mostram que o potencial de aquecimento global (PAG) associado às emissões de GEE de sistemas de produção de arroz irrigado é cerca de quatro vezes maior que o medido para cereais como o trigo e o milho. Segundo esses autores, a emissão média de metano de um cultivo de arroz é de 100 kg ha^{-1} , respondendo por quase 90% do potencial de aquecimento global da cultura.

O metano é o produto final da decomposição microbiana de materiais orgânicos em ambiente anóxico (LE MER; ROGER, 2001). Por essa razão, as estratégias mais promissoras para reduzir as emissões de CH_4 em sistemas alagados estão relacionadas à limitação no período de inundação do solo, mediante a drenagem ou intermitência da inundação, e à redução no aporte de material orgânico ao solo, mediante adequações no manejo de resíduos (LINQUIST et al., 2012a). Já as emissões de N_2O estão associadas à dinâmica do nitrogênio (N) nativo do solo ou proveniente de fertilizantes e à alternância nas condições de oxirredução (LIU et al., 2010), sendo, pois, influenciadas pelo manejo da água.

Até o presente momento ainda não existe um consenso a respeito do efeito da adubação nitrogenada sobre as emissões de CH_4 e N_2O

em cultivos de arroz irrigado; em algumas situações, o manejo do nitrogênio influencia as emissões desses GEE, mas em outras, esse efeito não é tão marcante (KRUGER; FRENZEL, 2003; LINQUIST et al., 2012a). Essa variabilidade de comportamento dificulta a avaliação do potencial mitigador do manejo da adubação nitrogenada sobre as emissões de CH_4 e N_2O pela lavoura de arroz.

A despeito do elevado potencial emissor de GEE associado ao cultivo de arroz irrigado, existe uma demanda crescente de produção do cereal para a alimentação humana (CASSMAN et al., 1998). O atendimento dessa demanda requer o incremento no uso de fertilizantes, particularmente nitrogenados, de forma a maximizar a produtividade da cultura.

O nitrogênio é o nutriente que proporciona maior retorno em produtividade ao arroz, mas apresenta uma dinâmica muito complexa em sistemas alagados, estando sujeito a perdas. Em decorrência disso, o aproveitamento de N pela cultura raramente excede 50% da quantidade aplicada (FAGERIA et al., 2009; HIRZEL; RODRIGUEZ, 2013; JI et al., 2007), limitando sua produtividade, onerando o custo de produção e podendo causar problemas sérios de poluição ambiental. Assume, portanto, grande importância o manejo adequado de fertilizantes nitrogenados no cultivo de arroz irrigado.

Uma forma de reduzir as perdas e elevar a eficiência de utilização do nitrogênio pelo arroz consiste na utilização de fertilizantes de liberação controlada, em substituição às fontes solúveis convencionais.

Os fertilizantes de liberação controlada consistem em fontes minerais solúveis revestidas com material de proteção pouco solúvel em água, semipermeável ou impermeável, possibilitando o controle de sua dissolução e, portanto, a liberação gradativa do nutriente no solo (LINQUIST et al., 2012b; TRENKEL, 1997; ZAVASCHI, 2010). A liberação do nutriente para o solo, ao longo do tempo, depende da espessura

e da natureza química do material de recobrimento, da quantidade de microfissuras em sua superfície e do tamanho do grânulo de fertilizante (GIRARDI; MOURÃO FILHO, 2004). O material de recobrimento dos fertilizantes inclui polímeros inorgânicos, orgânicos ou sintéticos a base de poliamidas, enxofre elementar (FERREIRA, 2012) e micronutrientes, como o cobre e o boro (NASCIMENTO, 2012).

Os fertilizantes de liberação controlada têm sido associados à melhoria da eficiência no uso de N pelas plantas e à redução nas perdas do nutriente para o ambiente. Destacam-se, ainda, por possibilitarem a redução no parcelamento das aplicações e pela melhor disponibilização às plantas, com conseqüente aumento da produtividade das culturas (DONG; WANG, 2007; FAN; MYLAVARAPU, 2010; RODRIGUES et al., 2010; TRENKEL, 2010). Em síntese, os benefícios advindos do uso de fertilizantes de liberação controlada estão vinculados a aspectos ambientais e agronômicos, particularmente à redução de perdas por lixiviação de nitrato (NO_3^-) ou na forma gasosa (amônia – NH_3 , óxido nítrico – NO e óxido nitroso – N_2O), à melhoria da qualidade dos alimentos, à menor demanda de mão de obra, à redução de estresses e toxidez e ao aprimoramento do sinergismo entre os nutrientes (SHAVIV, 2000).

O arroz irrigado é uma das culturas com maior potencial de utilização de fertilizantes de liberação controlada, pelo elevado potencial de perdas de N da cultura (TRENKEL, 2010). Mas ainda requer estudos para o estabelecimento do manejo em diferentes condições de cultivo, bem como seu efeito sobre o desempenho da cultura, eficiência de utilização de N pela cultura e as perdas do sistema.

Pelo exposto, realizou-se o presente trabalho, que teve por objetivo avaliar as emissões de metano e óxido nitroso associadas ao uso de fertilizante nitrogenado de liberação controlada no cultivo de arroz irrigado, bem como a eficiência agronômica desse fertilizante.

Materiais e Métodos

O experimento foi realizado sob condições de campo, na safra agrícola 2013/2014, em Planossolo Háplico, na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS.

Avaliaram-se quatro tratamentos de manejo da adubação nitrogenada para o arroz: Test.: testemunha com omissão da adubação nitrogenada; Ureia: dose recomendada de nitrogênio (DRN) para o arroz irrigado (120 kg ha^{-1} de N), como ureia, estabelecida em função dos resultados da análise do solo e considerando-se uma expectativa de resposta alta à adubação (SOSBAI, 2012), parcelada em três aplicações, em pré-semeadura (10 kg N ha^{-1}) e em cobertura (110 kg N ha^{-1}), sendo metade no estádio V4 (quatro folhas) e o restante em R0 (iniciação da panícula); FLC superfície: DRN como fertilizante nitrogenado de liberação controlada– FLC (ureia recoberta com polímeros derivados de poliacrilatos não hidrossolúveis, com 39,4% de N, apresentando 20%, 80% e 100% do N com liberação em até 15, 60 e 90 dias após a aplicação, respectivamente), aplicado integralmente em superfície em pré-semeadura; e FLC incorporado: DRN, como fertilizante nitrogenado de liberação controlada – FLC aplicado integralmente de forma localizada no sulco de semeadura. Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. As unidades experimentais ($2 \text{ m} \times 6 \text{ m}$) foram individualizadas por taipas, evitando a contaminação entre os tratamentos.

A cultivar de arroz irrigado de ciclo precoce PUITÁ INTA-CL foi semeada em 19 de novembro de 2013, em área preparada em sistema convencional. Utilizou-se um espaçamento entrelinhas de 17,5 cm e uma densidade de 100 kg ha^{-1} de sementes. Em pré-semeadura, aplicou-se a lanço e incorporou-se em área total 360 kg ha^{-1} da formulação 0-25-25. Esse e os demais tratamentos culturais para o arroz foram estabelecidos de acordo com as indicações técnicas para a cultura nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina

(SOSBAI, 2012). O início da irrigação ocorreu em 16 de dezembro de 2014, correspondendo ao estágio de quatro folhas (V4). A água foi drenada entre o 31° e 34° dia após a semeadura para aplicação de herbicida pós-emergente. Imediatamente após, retornou-se a irrigação da cultura, por inundação do solo. O cultivo estendeu-se até o dia 1° de março de 2014, quando se procedeu a colheita do arroz, correspondendo ao estágio de maturação dos grãos (R9). Para o acompanhamento dos estádios de desenvolvimento das plantas de arroz, utilizou-se, como referência, a escala de desenvolvimento de Counce et al. (2000).

As amostragens de ar para determinação das emissões de CH_4 e N_2O foram realizadas em intervalos regulares de aproximadamente sete dias, iniciando um dia antes da semeadura do arroz e estendendo-se até uma semana após a colheita da cultura.

Nas amostragens, utilizou-se o método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989), adaptado e padronizado pelo Comitê de Cultivo de Arroz e Fluxo de Gases, como parte do Projeto "Internacional Global Atmospheric Chemistry". Para tanto, em três, das quatro repetições de cada tratamento, foi disposto um sistema coletor de gases de efeito estufa (base + extensor(es) + câmara).

As bases são confeccionadas em alumínio, apresentando formato quadrado (64 cm x 64 cm) e 30 cm de altura. Essas são inseridas no solo a uma profundidade de 5 cm. Acima da superfície do solo, em dois lados opostos, as bases dispõem de dois orifícios com diâmetro de 2,5 cm, que permitem, quando presente, a circulação de água da área experimental para o interior do sistema coletor. Esses orifícios são fechados durante os períodos de coletas, utilizando-se de rolha de borracha. Apenas as bases dos sistemas coletores permaneceram nas parcelas experimentais durante todo o período de avaliação.

Durante as coletas, câmaras de alumínio foram dispostas sobre as bases. Quando as plantas de arroz atingiram alturas superiores

a do conjunto base-câmara, um ou dois extensores, conforme a necessidade, foram colocados entre as bases e as câmaras. Os conjuntos base-extensores-câmaras foram fechados hermeticamente durante as coletas, pela colocação de água em canaletas existentes na parte superior das bases e dos extensores (GOMES et al., 2009).

As amostragens de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre 9h e 12h, horário em que os fluxos de emissão de gases de efeito estufa são representativos das emissões médias diárias na região Sul do Brasil (COSTA et al., 2008). As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL) nos tempos 0, 5, 10 e 20 minutos após seu fechamento. O ar no interior das câmaras era homogeneizado durante 30 segundos antes de cada amostragem, por meio de ventiladores presentes na parte superior das câmaras e a temperatura interna, monitorada com auxílio de termômetro digital de haste com visor externo.

Durante os períodos de amostragens, as seringas eram acondicionadas em caixas térmicas e mantidas sob baixa temperatura, sendo o ar armazenado transferido, imediatamente após, para frascos específicos dotados de vácuo. As precipitações ocorridas ao longo do período de avaliação foram monitoradas continuamente.

As concentrações de CH_4 e N_2O nas amostras de ar foram determinadas por cromatografia gasosa, no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Por sua vez, os fluxos de CH_4 e de N_2O do solo (taxas de emissão) foram calculados pela relação linear entre a variação na concentração desses gases e o tempo de coleta, segundo a Equação 1:

$$f = \frac{dC}{dt} \frac{MPV}{RT} \frac{1}{A} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: dC/dt corresponde à mudança na concentração de CH_4 ou de N_2O (mmol mol^{-1}) no intervalo de tempo t (min); M é o peso molecular do respectivo gás (g mol^{-1}); P é a pressão (atm) no interior da câmara (assumida como 1,0 atm); V e T correspondem ao volume da câmara (L) e à temperatura interna (K); R é a constante universal dos gases ($0,08205 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) e A é a área da base da câmara (m^2).

A taxa de aumento de gás no interior das câmaras foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo. A emissão total do período foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de CH_4 e N_2O do solo (GOMES et al., 2009).

Na maturação de colheita (estádio R9), realizou-se a amostragem de planta para a determinação da produtividade de grãos. Para tanto, considerou-se uma parcela útil constituída pelas sete linhas centrais de plantas com 4 m de comprimento. O material colhido foi trilhado e seco, calculando-se a produtividade de grãos considerando-se um teor de umidade de 130 g kg^{-1} . Na mesma ocasião, procedeu-se à coleta da parte aérea das plantas de arroz dispostas em duas linhas de plantas de 0,5 m de comprimento. O material vegetal colhido foi dividido em duas frações (colmos e folhas e panículas com grãos). Essas foram secas em estufa à temperatura de 65°C , até massa constante. Após, determinou-se a produção de massa seca (MS) de ambas as frações. Esse material foi homogeneizado, amostrado e moído; na sequência, foi submetido à análise química para determinação do teor de N (TEDESCO et al., 1995). De posse dos valores de produção de matéria seca da parte aérea e do teor de N no tecido vegetal, calcularam-se as quantidades do nutriente acumuladas na parte aérea das plantas de arroz.

A recuperação aparente (RAP) do nitrogênio foi calculada pela diferença entre a quantidade de N acumulado nas plantas de arroz oriundas dos tratamentos com aplicação de fertilizante nitrogenado e a quantidade de N acumulado nas plantas de arroz (kg ha^{-1}) do tratamento testemunha com omissão da adubação nitrogenada, dividida pela quantidade de N aplicado (Eq. 2). A eficiência agrônômica no uso de N (EAUN) foi obtida pela diferença entre o rendimento de grãos (RG) dos tratamentos com aplicação de fertilizante nitrogenado e o rendimento de grãos (RG) do tratamento testemunha, dividido pela dose de N aplicado (Eq. 3).

$$RAP(\%) = \frac{N \text{ kg/ha (tratamento)} - N \text{ kg/ha (testemunha)}}{N \text{ aplicado (kg/ha)}} \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

$$EAUN(\text{kg kg}^{-1}) = \frac{RG \text{ kg/ha (tratamento)} - RG \text{ kg/ha (testemunha)}}{N \text{ aplicado (kg/ha)}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Com base nas concentrações medidas de CH_4 e N_2O pela análise das amostras de ar, calculou-se o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) de cada tratamento, que permite realizar a análise conjunta das emissões, considerando o PAGp desses gases em relação ao CO_2 , sendo 25 para o CH_4 , e 298 para o N_2O , para um horizonte de 100 anos (IPCC, 2007).

Os resultados de PAGp/RG foram relacionados através da divisão dos valores de Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) e rendimento de grãos (RG).

Os dados das variáveis rendimento de grãos, emissões totais de emissão de CH_4 e de N_2O , PAGp e PAGp/RG foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, foi aplicado o teste Tukey, ao nível de 5%.

Resultados e Discussão

Desempenho produtivo e utilização de nitrogênio pelas plantas de arroz

A produtividade de grãos proporcionada pelo tratamento em que se utilizou ureia como fonte de N para o arroz foi superior a do tratamento testemunha com omissão da adubação nitrogenada, sendo equiparada, porém, pelos tratamentos com uso de fertilizante de liberação controlada, cujo desempenho foi intermediário, ou seja, não diferiu tanto da ureia, quanto da testemunha (Tabela 1). Esse comportamento demonstra a importância do suprimento adequado de nitrogênio para o desempenho produtivo do arroz (SNYDER; SLATON, 2001). Indica, ainda, que o uso de fertilizantes de liberação controlada em aplicação única em pré-semeadura, independentemente da forma de aplicação, a lanço em superfície ou localizada no sulco de semeadura, proporciona produtividade de grãos do arroz semelhante ao da ureia parcelada em três aplicações. Esse resultado corrobora observações de Delgado e Mosier (1995) e Alves et al. (2013), que constataram pequenas variações na produtividade de arroz irrigado adubado com ureia e fonte nitrogenada protegida. Com relação à variável produção de matéria seca da parte aérea (colmos, folhas e grãos), todos os tratamentos com aplicação de nitrogênio ao arroz, independentemente da fonte, apresentaram desempenho semelhante entre si e superior à testemunha sem aplicação do nutriente (Tabela 1).

Por sua vez, os dados de nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz mostram que o uso de fertilizantes de liberação controlada, particularmente de forma localizada no sulco de semeadura, favoreceu a absorção de N; o desempenho dessa fonte de N não diferiu, porém, daquele proporcionado pela ureia, que foi equiparável, ainda, ao da testemunha (Tabela 1). Esse resultado é indicativo de que a liberação de nitrogênio de forma gradativa proporcionada pela fonte de liberação controlada favorece a absorção do nutriente pela planta, possivelmente devido à redução

de perdas do sistema solo-planta, visto que a produtividade de grãos proporcionada por essa fonte de N foi semelhante à da ureia.

As pequenas diferenças em produtividade de grãos e acumulação de N pela planta de arroz, proporcionadas pelo uso de fontes nitrogenada solúvel e de liberação controlada, não se refletiram em variações na recuperação aparente de N ou na eficiência agrônômica no uso de N, que foram semelhantes para os tratamentos com aplicação de fertilizante nitrogenado (Tabela 1). Esses resultados concordam com observações de Fageria et al. (2014) que, ao trabalharem com arroz irrigado e de terras altas, estabeleceram eficiência agrônômica semelhante entre a ureia revestida com polímero e a ureia comum.

Tabela 1. Produtividade de grãos, produção de matéria seca e nitrogênio acumulado na parte aérea, recuperação aparente de nitrogênio (Rap.N) e eficiência agrônômica de uso de nitrogênio (EAUN) de arroz irrigado, em função do manejo da adubação nitrogenada.

Manejo do N	Prod. grãos	Mat. seca	N acumulado	Rap. N	EAUN
	-----	kg ha ⁻¹	-----	%	kg kg ⁻¹
Test.	6.573b	12.001b	81,3b	---	---
Ureia	8.637a	15.582a	108,1ab	22,4a	17,2a
FLC superfície	8.199ab	15.605a	116,7ab	29,5a	13,5a
FLC incorporado	7.954ab	17.131a	128,9a	39,7a	13,2a
CV (%)	7,3	6,7	12,2	42,8	24,8

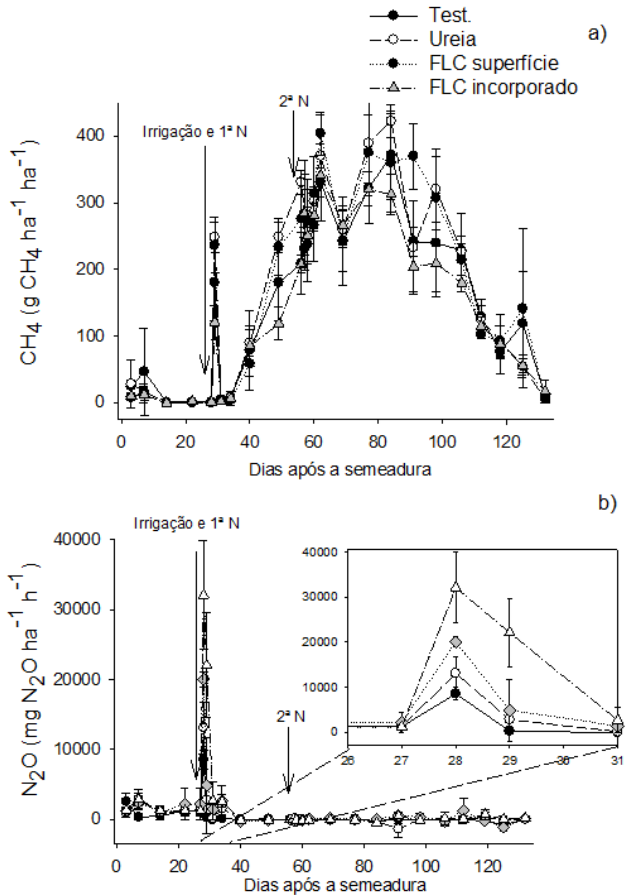
Test.: testemunha com omissão da adubação nitrogenada; Ureia: dose recomendada de nitrogênio para o arroz (DRN), como ureia, parcelada em pré-semeadura e em cobertura; FLC superfície: DRN, como fertilizante de liberação controlada – FLC, aplicado em superfície em pré-semeadura; e FLC incorporado: DRN, como FLC, aplicado incorporado no sulco de semeadura.

Médias seguidas de mesma, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fluxos de metano e óxido nitroso do solo

Os fluxos de metano do solo, associados aos diferentes tratamentos de manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado, variaram de 0,6 a 422,2 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ (Figura 1a). Os valores medidos nesse experimento foram menores que os reportados por Zschornack (2011) (-0,08 a 629,5 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹) para a mesma cultivar de arroz irrigado, em estudo realizado em Gleisolo Háplico, em Cachoeirinha, RS.

Muito embora a avaliação dos fluxos de CH₄ do solo tenha sido iniciada imediatamente antes da semeadura do arroz, emissões significativas desse GEE ocorreram somente após o início da irrigação por inundação do solo. Ao longo do período de cultivo do arroz, ocorreram três picos de emissão de CH₄, os quais foram coincidentes para todos os tratamentos avaliados. O primeiro pico de emissão ocorreu aos 29 dias após a semeadura (DAS), correspondendo dois dias após o início da irrigação. Nessa ocasião, a produção de CH₄ decorreu da fermentação da matéria orgânica facilmente degradável, presente no solo (NEUE et al., 1994). Após esse pico, a emissão de metano diminuiu sensivelmente em função da drenagem da lavoura entre 31 e 34 DAS, para a aplicação de herbicida pós-emergente. A produção de CH₄ no solo só tem início após a redução de uma fração significativa de Mn³⁺ e Fe³⁺, que são utilizados como aceptores de elétrons alternativos ao oxigênio na respiração de microrganismos anaeróbios (PONNAMPERUMA, 1972). Com a drenagem da lavoura, os compostos já reduzidos devem ter sido reoxidados pela presença de O₂ no solo, interrompendo temporariamente a produção e emissão de CH₄. Além da redução de formas oxidadas de Mn e de Fe, também o íon nitrato (NO₃⁻) deve ter sido reduzido, pois, no período compreendido entre o 5.º e o 8.º dia após o início da irrigação por inundação, foram observados fluxos de N₂O associados ao processo de desnitrificação. Com a recomposição e estabilização da lâmina d'água, aos 40 dias após a semeadura do arroz, as emissões de CH₄ do solo voltaram a ocorrer, como resultado da redução de compostos orgânicos pelas bactérias metanogênicas; esse é um efeito decorrente



Test.: testemunha com omissão da adubação nitrogenada; Ureia: dose recomendada de nitrogênio para o arroz (DRN), como ureia, parcelada em pré-semeadura e em cobertura; FLC superfície: DRN, como fertilizante de liberação controlada – FLC, aplicado em superfície em pré-semeadura; e FLC incorporado: DRN, como FLC, aplicado incorporado no sulco de semeadura.

Figura 1. Fluxos de metano (a) e de óxido nítrico (b) de solo cultivado com arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada. 1.^a N e entrada d'água - primeira cobertura com N e início da irrigação por inundação do solo e 2.^a N – segunda cobertura com N.

da redução sequencial de compostos inorgânicos (BODEGON; STAMS, 1999; SILVA et al., 2011). O segundo pico de emissão de CH_4 ocorreu aos 62 DAS, correspondendo ao início da fase reprodutiva do arroz (diferenciação da panícula – estágio R1). Nessa fase, o fluxo de CH_4 do solo é acentuado, devido à quantidade elevada de biomassa de raízes e ao aumento da capacidade de transporte desse gás pela planta de arroz, decorrente da grande quantidade de perfilhos e de aerênquima (NEUE et al., 1994).

O terceiro pico de emissão de CH_4 ocorreu no 77º dia após a semeadura do arroz para os tratamentos testemunha e com utilização de ureia como fonte de N para o arroz e no 84º DAS para os tratamentos com uso de fertilizante de liberação controlada, correspondendo à fase de floração do arroz. Zschornack (2011), Towprayoon et al. (2005) e Khosa et al. (2011) encontraram resultados semelhantes ao do presente estudo, sendo que os picos de emissão de CH_4 , nessa fase da cultura, ocorreram, aproximadamente, aos 80 DAS. Emissões de quantidades elevadas de CH_4 na fase reprodutiva do arroz resultam de condições ambientais favoráveis à atividade metanogênica (TOWPRAYOON et al., 2005), particularmente elevada capacidade de transporte de CH_4 pelas plantas de arroz (KHOSA, 2011; NEUE et al., 1994) e de exsudação radicular, resultante da intensa atividade fotossintética das plantas; os exsudatos radiculares são os principais substratos para as bactérias metanogênicas nessa fase do cultivo de arroz (LE MER et al., 2001; NEUE, 1993). Em lavouras de arroz, até 60% das emissões de CH_4 decorrem da decomposição dos exsudatos ou de raízes mortas (WATANABE et al., 1999).

No final do período de cultivo do arroz, correspondendo à fase de maturação da cultura, houve redução nas emissões de CH_4 . Esse comportamento é relativamente comum em cultivos de arroz irrigado (LEE et al., 2014; WANG et al., 2000; WASSMANN et al., 2000), estando associado ao fato de a taxa fotossintética da planta diminuir, por ocasião do início do desenvolvimento dos grãos, limitando a disponibilidade de substratos para a produção de CH_4 (SINHA, 1995).

O decréscimo foi ainda mais intenso no final do período de cultivo, em razão da supressão da irrigação visando à colheita, fase essa em que o fluxo de CH_4 do solo foi baixo, em decorrência da presença de O_2 , inibindo a atividade das bactérias metanogênicas.

Com relação aos fluxos de N_2O do solo (Figura 1b), esses foram muito baixos no período que antecedeu a primeira cobertura com N e o início da irrigação do arroz. Atribui-se esse comportamento à estabilidade na condição de solo oxidado. Assim, mesmo na presença de formas minerais de nitrogênio no solo, não havia condição favorável à redução de NO_3^- , com a liberação de N_2O como produto intermediário. Independentemente do manejo da adubação nitrogenada, a emissão máxima de N_2O ocorreu aos 28 DAS, ou seja, um dia após o início da irrigação e da primeira cobertura com N no tratamento cuja fonte de N foi a ureia. O íon NO_3^- é o primeiro composto inorgânico a ser reduzido após a inundação do solo, antecedendo a redução do Fe, Mn e de compostos orgânicos. Adicionalmente, no tratamento com uso de ureia, esse é o momento de maior disponibilidade de N no solo, condição que, associada à mudança no estado de oxirredução do solo, favorece à alternância nos processos de nitrificação e desnitrificação, principais responsáveis pela produção de N_2O no solo (SIGNOR et al., 2013). Segundo Skiba e Smith (2000), a disponibilidade de N mineral e o conteúdo de água no solo são os fatores mais relevantes e determinantes de emissões de N_2O . O tratamento testemunha, como omissão da adubação nitrogenada, apresentou emissão máxima de $8.529 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Por não ter recebido aporte de N, o N_2O emitido está integralmente associado ao N nativo do solo. O pico máximo de emissão do tratamento com uso de ureia foi de $13.076 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, valor intermediário entre os tratamentos testemunha e com aplicação de fertilizante nitrogenado de liberação controlada a lanço em superfície ($20.041 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e localizado no sulco de semeadura ($32.076 \text{ mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Esse resultado indica que o parcelamento da aplicação da ureia, especialmente quando a primeira cobertura com

N é realizada imediatamente antes da entrada d'água na lavoura, minimiza o potencial de emissão de N_2O do solo, comparativamente ao uso de fonte de liberação controlada integralmente em pré-semeadura. Nesse sentido, verifica-se que a aplicação do fertilizante de liberação controlada a lançar em superfície foi benéfica, proporcionando menor emissão de N_2O , relativamente à concentração do produto no sulco de semeadura.

Após o pico estabelecido em sucessão ao início da irrigação por inundação do solo, as emissões de N_2O de todos os tratamentos diminuíram drasticamente, mantendo-se em patamares baixos até o final do período de cultivo do arroz, incluindo o período posterior à segunda cobertura com N no tratamento com uso de ureia. Dois fatores devem ter contribuído para esse último resultado: a estabilidade na condição de redução do solo e a elevada demanda de N da planta de arroz no início da fase reprodutiva, proporcionando rápida absorção pela planta e reduzindo os riscos de perdas do sistema solo-planta (NORMAN et al., 2002).

Os valores de emissões de N_2O medidos a partir do 40° DAS oscilaram entre picos positivos e negativos de baixa magnitude, com valores extremos variando de -1.403 a 1.235,62 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹. Em solos cultivados com arroz irrigado por inundação, os fluxos de N_2O normalmente ocorrem em níveis baixos (IIDA et al., 2007; LIU et al., 2010), podendo ocorrer influxos desse GEE em determinados momentos, que representam absorção pelo solo (CAI et al., 1997; HOU et al., 2000). A absorção de N_2O ocorre por ação de bactérias desnitrificadoras, que reduzem o N_2O a N_2 sob condições anaeróbias, devido à baixa concentração de NO_3^- (CHAPUIS-LARDY et al., 2007).

Emissões totais de CH₄ e N₂O pelo solo

As emissões totais de CH₄, ao longo do ciclo de cultivo do arroz, não foram influenciadas pelo manejo da adubação nitrogenada (Figura 2a). Esse resultado confirma observações de Ruser et al. (1998), que compararam o efeito de doses de ureia no cultivo de arroz. Da mesma forma, Xiong et al. (2007) não verificaram distinção nas emissões de CH₄ em arroz irrigado adubado com fonte orgânica ou sulfato de amônio.

As emissões totais de N₂O foram: $0,44 \pm 0,15$ kg N₂O ha⁻¹, para o tratamento testemunha com omissão da adubação nitrogenada; $1,09 \pm 0,57$ kg N₂O ha⁻¹, para o tratamento com aplicação de ureia; $2,09 \pm 0,97$ kg N₂O ha⁻¹, para o tratamento com aplicação de fertilizante nitrogenado de liberação controlada a lanço em superfície; e $2,94 \pm 0,88$ kg N₂O ha⁻¹, para o tratamento com aplicação de fertilizante nitrogenado de liberação controlada localizado no sulco de semeadura (Figura 2b). Ainda que relativamente baixos, os fluxos totais de N₂O determinados no presente estudo foram superiores aos medidos por Wesz (2012) ($-0,1 \pm 0,05$ kg N₂O ha⁻¹) e Buss (2012) ($0,22$ kg N₂O ha⁻¹) em estudos realizados no mesmo solo.

As emissões totais de N₂O dos tratamentos com aplicação de fonte de N foram semelhantes entre si. Com exceção do tratamento com aplicação de fertilizante nitrogenado de liberação controlada no sulco de semeadura, os demais equipararam-se, ainda, ao tratamento testemunha. Esse resultado mostra que, tanto a ureia, fonte convencional de nitrogênio para o arroz irrigado, como o fertilizante de liberação controlada com aplicação a lanço em pré-semeadura, não intensificam o efluxo de N₂O do solo, quando associados à irrigação por inundação contínua. Esse resultado corrobora observações de Cai et al. (1997), para a ureia.

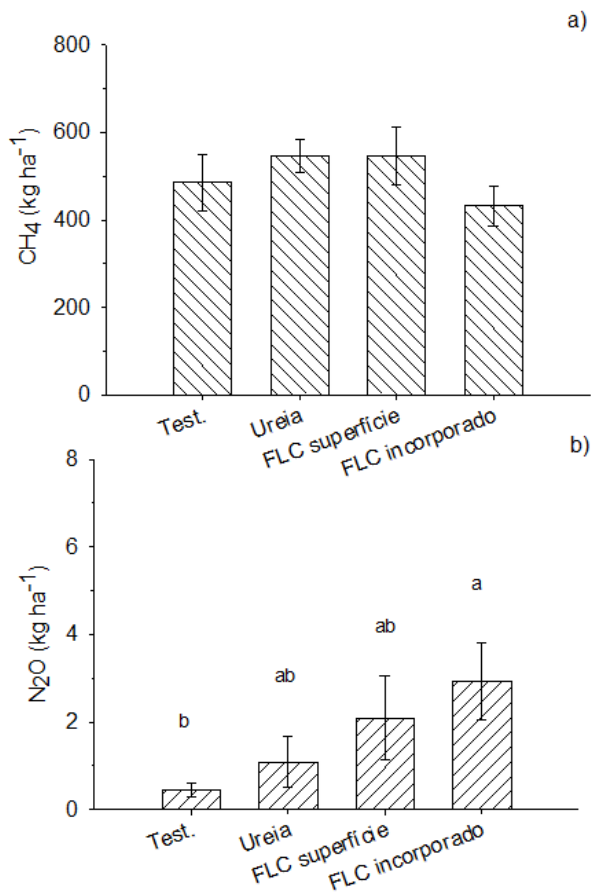
Tal comportamento deve estar associado ao fato de a aplicação de ureia ter sido realizada de forma parcelada, manejo que é

recomendado na região Sul do Brasil, com vistas a otimizar a utilização do nutriente pelo arroz e minimizar as perdas do sistema solo-planta. Vale ressaltar, ainda, que os fertilizantes de liberação controlada foram aplicados integralmente por ocasião da semeadura do arroz, seja a lanço em superfície ou de forma localizada no sulco de semeadura, condição que favoreceu, momentaneamente, as perdas de N na forma de N_2O , imediatamente após o início da irrigação por inundação do solo, em função da alternância nos processos de oxirredução do solo (XING et al., 2009).

Os resultados de pesquisas comparando fertilizantes de liberação controlada com fontes solúveis são divergentes. Por um lado, Jiang et al. (2010) e Matos (2011) determinaram, para a cultura de milho, emissões de N_2O superiores quando do uso de fertilizantes de liberação lenta relativamente à ureia. Por outro lado, Delgado e Mosier (1995), trabalhando com arroz irrigado, e ZANATTA et al. (2010), com pastagens, observaram redução nas emissões de N_2O , devido ao uso de fertilizantes nitrogenados de liberação lenta, comparativamente à fonte solúvel. De acordo com Smith et al. (1997), a eficiência das fontes protegidas, mesmo sendo menos solúveis em água, depende da umidade do solo.

Os fatores de emissão das fontes de nitrogênio, considerando a dose aplicada do nutriente, foram de 0,91%, 1,74% e 2,45%, respectivamente, para a ureia e o fertilizante de liberação controlada aplicado a lanço e em superfície ou localizado no sulco de semeadura. Independentemente da fonte/manejo do N, os valores determinados foram bastante baixos, o que é relativamente comum, considerando-se a condição estável de ambiente anaeróbio mantida durante a maior parte do período de cultivo do arroz.

Com exceção do tratamento com uso de ureia, os resultados encontrados para o fator de emissão foram superiores ao fator de emissão padrão proposto pelo IPCC (2007), que é de 1% do N aplicado ao solo. Os fatores de emissão medidos foram superiores, ainda,



Test.: testemunha com omissão da adubação nitrogenada; Ureia: dose recomendada de nitrogênio para o arroz (DRN), como ureia, parcelada em pré-semeadura e em cobertura; FLC superfície: DRN, como fertilizante de liberação controlada – FLC, aplicado em superfície em pré-semeadura; e FLC incorporado: DRN, como FLC, aplicado incorporado no sulco de semeadura.

Figura 2. Emissões totais de CH₄ (a) e de N₂O (b) em solo cultivado com arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada. Letras distintas nas colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

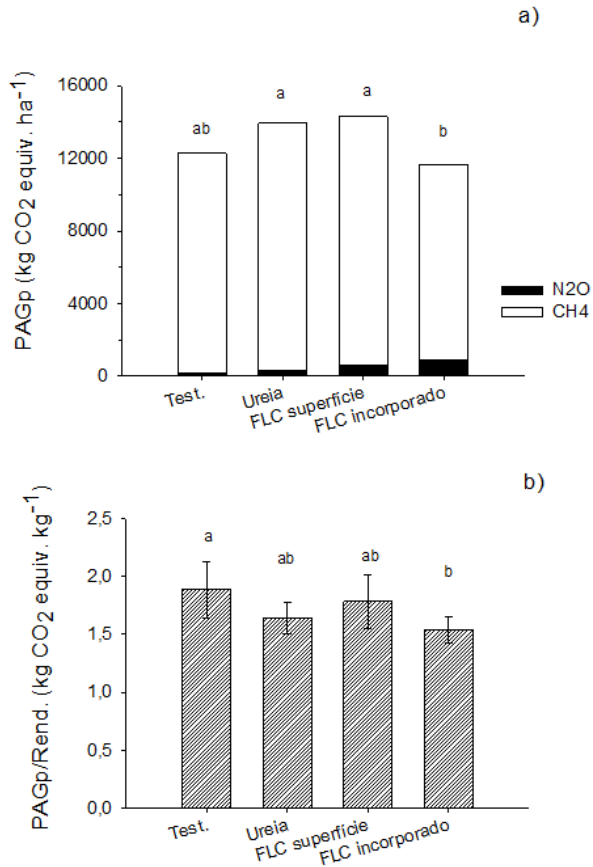
aos encontrados por Matos (2011), que avaliou fontes nitrogenadas de liberação lenta em cultivo de milho. Possivelmente, a diferença entre os valores de fator de emissão dos fertilizantes nitrogenados, avaliados no presente trabalho, e os demais estudos referidos deva-se ao fato de que, em cultivos de sequeiro desenvolvidos em sistema de plantio direto e com aplicação superficial de N, a forma preponderante de perda de N é via volatilização de amônia.

Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) e relação entre PAGp e rendimento de grãos

O manejo da adubação nitrogenada influenciou o potencial de aquecimento global parcial medido no cultivo de arroz irrigado. Os valores determinados corresponderam a 12.275 kg CO₂ eq. ha⁻¹ para a testemunha com omissão da adubação nitrogenada; 13.946 kg CO₂ eq. ha⁻¹ para a ureia; 14.297 kg CO₂ eq. ha⁻¹ para o fertilizante nitrogenado de liberação controlada aplicado a lanço em superfície e 11.683 kg CO₂ eq. ha⁻¹ para o fertilizante nitrogenado de liberação controlada aplicado de forma localizada no sulco de semeadura (Figura 3a).

O metano respondeu por quase a totalidade do PAGp para todos os tratamentos, representando 98,9% para a testemunha sem N; 97,7% para a ureia, 95,6% para o fertilizante nitrogenado de liberação controlada aplicado a lanço e 92,5% para o fertilizante de liberação controlada aplicado no sulco de semeadura. Resultados similares, em que a contribuição do CH₄ para o PAGp é muito superior à do N₂O são comuns no cultivo de arroz irrigado por inundação, os quais foram relatados, recentemente, em trabalhos realizados no mesmo solo e região do presente estudo, por Scivittaro et al. (2013) e Wesz (2012).

A relação entre o potencial de aquecimento global e o rendimento de grãos do arroz também diferiu entre os tratamentos de manejo da adubação nitrogenada, destacando-se o desempenho do fertilizante de liberação controlada aplicado de forma localizada no sulco de



Test.: testemunha com omissão da adubação nitrogenada; Ureia: dose recomendada de nitrogênio para o arroz (DRN), como ureia, parcelada em pré-semeadura e em cobertura; FLC superfície: DRN, como fertilizante de liberação controlada – FLC, aplicado em superfície em pré-semeadura; e FLC incorporado: DRN, como FLC, aplicado incorporado no sulco de semeadura.

Figura 3. Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) (a) e relação entre o potencial de aquecimento global parcial e rendimento de grãos (PAGp/Rend.) (b) em cultivo de arroz irrigado em função do manejo da adubação nitrogenada. Letras distintas nas colunas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

semeadura, que apresentou menor índice (Figura 3b). Os resultados obtidos mostram que o uso de fertilizante nitrogenado de liberação controlada em aplicação única em pré-semeadura apresenta desempenho semelhante ao da aplicação de ureia de forma parcelada entre a semeadura e em cobertura, quando se considera a relação entre o PAGp e a produtividade de grãos. Ressalta-se que o tratamento testemunha, por proporcionar menor produtividade de grãos que os demais e apresentar emissões, particularmente de metano, próxima a dos tratamentos com adubação nitrogenada, apresentou maior relação PAGp/RG que os demais.

Conclusões

O uso de fertilizante nitrogenado de liberação controlada em dose única em pré-semeadura em cultivo de arroz irrigado proporciona produtividade de grãos e eficiência agrônômica no uso do nitrogênio, semelhantes à da ureia aplicada de forma parcelada entre a semeadura e em cobertura.

A aplicação parcelada de ureia e de fertilizante nitrogenado de liberação controlada em dose única em pré-semeadura (a lanço em superfície ou localizado no sulco de semeadura) proporciona emissões totais de CH_4 e N_2O semelhantes em cultivo de arroz irrigado por inundação contínua.

O metano contribui com mais de 90% para o potencial de aquecimento global parcial do arroz irrigado, independentemente do manejo da adubação nitrogenada com fontes solúvel ou de liberação controlada.

O aporte de nitrogênio para o arroz irrigado, via adubação, com fontes solúvel ou de liberação controlada, é uma prática sustentável, por otimizar o rendimento de grãos e manter estável a relação entre o potencial de aquecimento global da cultura e o rendimento de grãos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapergs e ao CNPq, pela concessão das bolsas de estudo e auxílio financeiro para a realização do trabalho, e aos funcionários do Laboratório de Fertilidade do Solo da Embrapa Clima Temperado, pelo auxílio na coleta e preparo de amostras de ar.

Referências

ALVES, K. D.; SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K. Aplicação de nitrogênio em cobertura no arroz irrigado monitorada com o uso do sensor portátil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2013. v. 2, p.1284-1287.

BODEGOM, P. M.; STAMS, A. J. M. Effects of alternative electron acceptors and temperature on methanogenesis in rice paddy soils. **Chemosphere**, v. 39, n. 2, p. 167-182, 1999.

BUSS, G. L. **Emissões de metano e óxido nitroso em cultivo de arroz irrigado por aspersão, alagamento contínuo e intermitente**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. **Plant Soil**, v. 196, p. 7-14, 1997.

CASSMAN, K. G., PENG, S., OLK, D. C.; LADHA, J. K.; REICHARDT, W.; DOBERMANN, A.; SING, U. Opportunities for increased nitrogen-

use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. **Field Crops Research**, v. 56, p. 7-39, 1998.

CHAPUIS-LARDY, E.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J. L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, p.1-17, 2007.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLINI, E. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 38, n. 7, p. 2049-2053, 2008.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v. 40, p. 436-443, 2000.

DELGADO, J. A.; MOSIER, A. R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, n. 5, p. 1105-1111, 1995.

DONG, Y.; WANG, Z. Release Characteristics of different N forms in an uncoated slow/controlled release compound fertilizer. **Agricultural Sciences in China**, v. 6, n. 3, p. 330-337, 2007.

FAGERIA, N. K.; CARVALHO, M. C. S.; SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; PAIXÃO, M. R. R. Eficiência agrônômica de ureia revestida com polímero em arroz de terras altas e de várzea irrigado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 31.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 15.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 13.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 10., 2014, Araxá. **Anais...** Araxá: Núcleo Regional Leste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. 1 CD-ROM.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B.; CUTRIM, V. A. Produtividade e eficiência de uso de nitrogênio por genótipos de arroz irrigado, In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CADEIA PRODUTIVA DO ARROZ, 2.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DO ARROZ, 8., 2009, Brasília. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. p. 204-207.

FAN, Y.; MYLAVARAPU, R. Effects of irrigation and nitrogen management for potato tuber yield, N recovery and N leaching. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., 2010, Brisbane, Australia. **Proceedings...** 2010. p. 154-157.

FERREIRA, D. A. **Eficiência agrônômica da ureia revestida com polímero na adubação do milho.** 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GIRARDI, E. A.; MOURÃO FILHO, F. A. A. Crescimento inicial de laranjeira 'Valência' sobre dois porta-enxertos em função da adubação nitrogenada no plantio. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 1, p. 117-119, 2004.

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. S.; PICCOLO, M. C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 106, p. 36-44, 2009.

HIRZEL, J.; RODRÍGUEZ, F. Increasing nitrogen rates in rice and its effect on plant nutrient composition and nitrogen apparent recovery. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 73, n.4, p. 385-390, 2013.

HOU, A. X.; CHEN, G. X.; WANG, Z. P.; VANCLEEMPOT, O.; PATRICK JR., W. H. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation

to soil redox and microbiological processes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 2180-2186, 2000.

IIDA, T.; DEB, S. K.; KHARBUJA, R. G. Nitrous oxide emission measurement with acetylene inhibition method in paddy fields under flood conditions. **Paddy and Water Environmental**, v. 5, p. 83-91, 2007.

IPCC. **Climate Change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (Ed.). Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

JI, X.; ZHENG, S.; LU, Y.; LIAO, Y. Study of dynamics of floodwater nitrogen and regulation of its runoff loss in paddy field-bases two-cropping rice with urea and controlled release nitrogen fertilizer application. **Agricultural Sciences in China**, v. 6, n. 2, p. 189-199, 2007.

JIANG, J.; HU, Z.; SUN, W.; HUANG, Y. Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 135, p. 216-225, 2010.

KHOSA, M. K.; SIDHU, B. S.; BENBI, D. K. Methane emission from rice fields in relation to management of irrigation water. **Journal of Environmental Biology**, v. 32, p. 169-172, 2011.

KRUGER, M.; FRENZEL, P. Effects of N-fertilisation on CH₄ oxidation and production, and consequences for CH₄ emissions from microcosms and rice fields. **Global Change Biology**, v. 9, p. 773-784, 2003.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, v. 37, n. 1, p. 25-50, 2001.

LEE, H. J.; KIM, S. Y.; KIM, P. J.; MADSEN, E. L.; JEON, C. O. Methane emission and dynamics of methanotrophic and methanogenic communities in a flooded rice field ecosystem. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 88, p. 195-212, 2014.

LINQUIST, B. A.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C. M.; VAN KESSEL, C.; VAN GROENIGEN, K. J. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: a quantitative review and analysis. **Field Crops Research**, v. 135, p. 10-21, 2012a.

LINQUIST, B. A.; VAN GROENIGEN, K. J.; ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C. M.; VAN KESSEL, C. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. **Global Change Biology**, v. 18, p. 194-209, 2012b.

LIU, S.; QIN, Y.; ZOU, J.; LIU, Q. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 906-913, 2010.

MATOS, T. S. **Avaliação da eficiência agrônômica de novos fertilizantes nitrogenados granulados baseados no uso da ureia**. 2011. 64 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MOSIER, A. R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (Ed.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere**: report of the Dahlem Workshop. Berlin: Wiley, 1989. p. 175-187.

NASCIMENTO, C. A. C. **Uréia recoberta com S^o, Cu e B em soca de cana-de-açúcar colhida sem queima**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

NEUE, H. U.; WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; ALBERTO, M. C. R.; ADUNA, J. B. Diel and seasonal patterns of methane fluxes in rice fields. **International Rice Research Note**, v. 19, n. 3, p. 33-34, 1994.

NEUE, H. U. Methane emission from rice fields: wetland rice fields may make a major contribution to global warming. **BioScience**, v. 43, n. 7, p. 466-73, 1993.

NORMAN, R. J.; WILSON JR., C. E.; SLATON, N. A.; BOOTHE, D. L.; GRIGGS, B. R. **Influence of nitrogen fertilizer source, application rate and timing on grain yields of delayed, flood rice**. Atlanta: Potash and Phosphate Institute, 2002. 5 p.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p. 29-96, 1972.

RODRIGUES, M. A.; SANTOS, H.; RUIVO, S.; ARROBAS, M. Slow-release N fertilizers are not an alternative to urea for fertilization of autumn-grown tall cabbage. **European Journal of Agronomy**, v. 32, p. 137-143, 2010.

RUSER, R.; FLESSA, H.; SCHILLING, R.; STEINDL, H.; BEESE, F. Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 1587-1595, 1998.

SCIVITTARO, W. B.; SILVEIRA, A. D.; BUSS, G. L.; WOLTER, R. C. D.; SOUSA, R. O.; ROSA, C. M.; BAYER, C. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa pelo manejo da água em lavoura de arroz

irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2013. p. 876-879.

SHAVIV, A. Advances in controlled-release fertilizers. **Advances in Agronomy**, v. 71, p. 1-49, 2000.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 1-9, 2013.

SILVA, L. S.; GRIEBELER, G.; MOTERLE, D. F.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; POCOJESKI, E. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 473-481, 2011.

SINHA, S. K. Global methane emission from rice paddies: excellent methodology but poor extrapolation. **Current Science**, v. 68, p. 643-646, 1995.

SKIBA, U.; SMITH, K. A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. **Chemosphere**, v. 2, p. 379-386, 2000.

SMITH, K. A.; MCTAGGART, I. P.; TSURUTA, H. Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. **Soil Use and Management**, v. 13, p. 296-304, 1997.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, D.; KUMAR, P.; McCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIROTENKO, O. Agriculture. In: METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L. A. (Ed.). **Climate change 2007: mitigation**, contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2007. p. 497-540.

SNYDER, C. S.; SLATON, N. A. Rice production in the United States - an overview. **Better Crops**, v. 85, n. 3, p. 1-7, 2001.

SOSBAI (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO). **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Itajaí: SOSBAI, 2012. 179 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos-UFRGS, 1995. 174 p.

TOWPRAYOON, S.; SMAKGAHN, K.; POONKAEW, S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. **Chemosphere**, v. 59, n. 11, p. 1547-1556. 2005.

TRENKEL, M. E. **Controlled release and stabilized fertilisers in agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997. 151 p.

TRENKEL, M. E. **Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 160 p.

WANG, X. Y.; XU, Y. C.; LI, Z.; GUO, Y. X.; WASSMANN, R.; NEUE, H. U.; LANTIN, R. S.; BUENDIA, L. V.; DING, Y. P.; WANG, Z. Z. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 58, p. 55-63, 2000.

WASSMANN, R.; LANTIN, R. S.; NEUE, H. U.; BUENDIA, L. V.; CORTON, T. M.; LU, Y. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. III. Mitigation options and future research needs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 58, p. 23-36, 2000.

WATANABE, A.; TAKEDA, T.; KIMURA, M. Evaluations of origins of CH₄ carbon emitted from rice paddies. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. 19, p. 23623-23629, 1999.

WESZ, J. **Mitigação das emissões de metano e óxido nitroso em Planossolo pela adequação do manejo da água em cultivo de arroz irrigado**. 2012. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

XING, G.; ZHAO, X.; XIONG, Z.; YAN, X.; XU, H.; XIE, Y.; SHI, S. Nitrous oxide emission from paddy fields in China. **Acta Ecologica Sinica**, v. 29, p. 45-50, 2009.

XIONG, Z.; XING, G.; ZHU, Z. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen. **Pedosphere**, v. 17, p. 146-155, 2007.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; VIEIRA, F. C. B.; GOMES, J.; TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in south brazilian Gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1653-1665, 2010.

ZAVASCHI, E. **Volatilização de amônia e produtividade do milho em função da aplicação de ureia revestida com polímero**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Solo e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ZSCHORNACK, T. **Emissões de metano e de óxido nitroso em sistemas de produção de arroz irrigado no Sul do Brasil e potencial de mitigação por práticas de manejo**. 2011. 87 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.



Clima Temperado

MINISTÉRIO DA
**AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO**



CGPE 14013